

# 基于 BP 网络和序优化方法的火控攻击方案寻优

李 波, 刘学全, 高晓光

(西北工业大学电子信息学院, 陕西 西安 710129)

**摘 要:** 火控攻击方案寻优是一个基于仿真的优化问题, 针对传统优化方法计算量大而且耗时多的不足, 运用序优化理论通过排序比较和目标软化等思想来缩小搜索空间、提高搜索效率。首先建立了以导弹目标截获概率为效能指标的方案评估精确模型, 然后用拟合后的基于误差反向传播(back propagation, BP)算法的神经网络作为粗糙评估模型, 最后运用序优化搜寻达到一定目标截获概率的较优火控攻击方案。算例分析表明, 序优化方法能在确保以足够高的概率寻得足够好方案的同时, 有效提高搜索效率。

**关键词:** 火控攻击方案寻优; 仿真优化; 序优化; 评估模型; 反向传播网络

**中图分类号:** TP 202.7

**文献标志码:** A

**DOI:**10.3969/j.issn.1001-506X.2013.09.14

## Fire control attack scheme optimization based on BP network and ordinal optimization

LI Bo, LIU Xue-quan, GAO Xiao-guang

(School of Electronics and Information, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710129, China)

**Abstract:** Fire control attack scheme optimization is one of the simulation optimization problems. Considering the large calculative load and a great time cost required for traditional optimization algorithms, the ordinal optimization theory is used to narrow down the searching space and improve the searching efficiency. Firstly, an accurate evaluation model which is on the basis of missile acquisition probability is established. Secondly, the neural network based on back propagation (BP) fitted is treated as the rough evaluation model. Finally, the ordinal optimization is used to search a better attack scheme which reaches a certain acquisition probability. The example analysis shows that the ordinal optimization can find a good scheme in high probability and improve the searching efficiency effectively.

**Keywords:** fire control attack scheme optimization; simulation optimization; ordinal optimization; evaluation model; back propagation (BP) network

## 0 引 言

在航空武器装备先期概念研究、立项论证、研制方案优化和作战使用研究中, 经常会遇到这样一类问题: 需要从众多火控攻击方案中寻找满足给定作战效能的攻击方案, 也即当输出是给定效能指标的最佳值时, 确定得到这一最佳输出的火控攻击条件。该类问题(也即火控攻击方案寻优问题)虽然也是一类最优化问题, 但与一般的最优化问题不同的是: 对火控攻击方案的评价, 不能以一个解析式作为优化函数, 而通常都要借助空战模拟仿真, 以仿真输出结果作为评价函数。因此, 火控攻击方案寻优问题是一个基于仿真的优化问题<sup>[1-2]</sup>。

解决基于仿真的优化问题, 枚举法虽然能选出最优方案, 但当模型输入参数维数较多、备选方案数量庞大时, 枚举法会因计算量太大而难以实现; 当使用其他非枚举搜索算法来求解时, 由于可能产生组合爆炸问题, 而使得搜索时间过长, 因此在实际应用中也存在很大困难。对于仿真优化问题, 由于存在随机性、计算耗时和 NP-hard 等难点, 运用常用的优化算法都很难得到很好的效果。在这样的背景下, 大量学者提出了一些仿真优化算法。目前, 仿真优化算法可归纳为基于梯度的方法、随机优化方法、响应曲面法、启发式方法和统计方法等<sup>[3-7]</sup>, 以及这些方法的混合。在众多方法中, 序优化理论由于使用了“排序比较”和“目标软件”的思想, 使得在求解大规模复杂优化问题时大大减小了

计算量,而求得的足够好解又能以很高的概率满足要求,因此序优化理论已经作为一种解决复杂仿真优化问题的有效工具在经济<sup>[8]</sup>、交通运输<sup>[9]</sup>、电力系统<sup>[10-12]</sup>等领域获得了广泛应用并取得了理想成果,在航空航天领域也有一定的应用<sup>[13-15]</sup>。

本文将采用序优化理论的思想,通过利用误差反向传播(back propagation, BP)网络构建的粗糙模型进行粗糙评估来有效缩小搜索空间,提高搜索效率,以便利用较少的计算量来得到满足目标截获概率限制的较优攻击方案。

## 1 序优化理论

序优化(ordinal optimization, OO)理论最早由哈佛大学何毓琦(Ho Yu-chi)教授等人于1992年提出<sup>[16]</sup>,其目的是解决使用传统优化方法求解复杂优化问题时计算量大的问题。序优化理论由两个基本思想<sup>[17]</sup>构成,具体是:

(1)“排序比较”。由于“序”比“值”更容易确定,可以用“排序比较”代替精确值比较。

(2)“目标软化”。由于传统优化问题都以寻找最优解为目标,这使得传统方法的搜索量和求解难度加大;序优化理论从工程实际出发,提出“目标软化”思想,即以寻找足够的满意解代替寻找最优解。通过放宽求解目标,进而大大降低了使用传统优化方法的计算量。

在使用序优化理论解决复杂仿真优化问题时,还会经常提到“有序性能曲线”(ordered performance curve, OPC)这个概念。有序性能曲线(见图1)是由所有可行解按照性能指标大小进行排序(升序)后得到的,其横坐标表示排序后的可行解序号,纵坐标表示对应可行解的评估函数值。在应用序优化理论解决实际仿真优化问题过程中,通常无法得到精确的OPC曲线,但可以利用粗糙模型得到曲线近似描述。图1中的OPC曲线有5种类型:Neutral型、Flat型、Steep型、U-shaped型、Bell型,其对应5种目标优化问题类型。在实际应用中,后续相关计算常量的取值就与OPC类型相关。

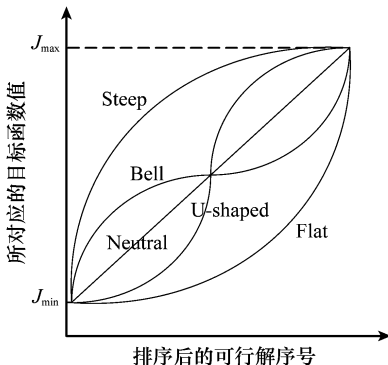


图1 序优化 OPC 曲线示意

## 2 火控攻击方案评估模型

建立一个恰当、可靠的方案评估模型是解决方案寻优问题的第一步,也是最重要的一步。评估模型太简单,不能给实际问题提供真实可信的信息;模型太复杂,会造成寻优问题不易求解。因此,应该合理地选取火控攻击方案中的主要影响因素和评估攻击方案的效能指标,以有效地控制评估模型的复杂程度。

### 2.1 影响攻击效果的性能指标的选取

在现代空战中,影响攻击效果的主要因素有:机载探测系统性能、导性能、导弹发射时机、目标隐身性能、空战态势等。这些影响因素中,目标隐身性能和空战态势具有很大的不确定性和不可控性,而且本文主要研究的是火控系统配置方案对导弹攻击效果的影响,因此选取机载探测系统的性能(主要指探测误差)和导弹发射时机作为影响攻击效果的性能指标。

### 2.2 评估攻击效果的效能指标的选取

在空战效能评估中,通常选取导弹命中概率作为效能指标。但在现代空战中主要使用复合制导空空导弹,导弹能否命中目标不仅与中制导段的火控制导信息有关,还与末制导段导弹导引头跟踪性能相关;且中制导结束时,导弹雷达导引头是否能够截获目标是导弹最终能否命中目标的重要前提。因此,为了能充分反映火控系统配置方案对导弹攻击效果的影响程度,本文选取导弹截获概率作为评估攻击效果的效能指标。

### 2.3 火控攻击方案评估模型的建立

结合前面的分析,火控攻击方案评估模型可由图2表示,也可用式(1)表示。

$$P_{\text{截获}} = f(D_{\text{发射}}, e_{\text{方位}}, e_{\text{俯仰}}, e_{\text{距离}}, e_{\text{速度}}) \quad (1)$$

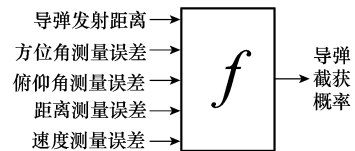


图2 火控攻击方案评估模型简图

由于导弹攻击过程是一个复杂的系统过程,式(1)无法用一个更为具体的可解析表达式来表示。对于空空导弹目标截获概率,最常用的方法是通过蒙特卡罗仿真,用统计法来评估导弹目标截获概率<sup>[18-19]</sup>。本文也将采用仿真模型作为火控攻击方案的评估模型。

图3给出了目标截获概率仿真计算的流程。设定初始条件后运行程序,程序可在同样的初始态势下反复模拟导弹攻击目标全过程。设程序中运行了 $m$ 次导弹攻击目标过程,其中有 $n$ 次导弹截获了目标,则目标截获概率

$$P_{\text{截获}} = \frac{n}{m} \quad (2)$$

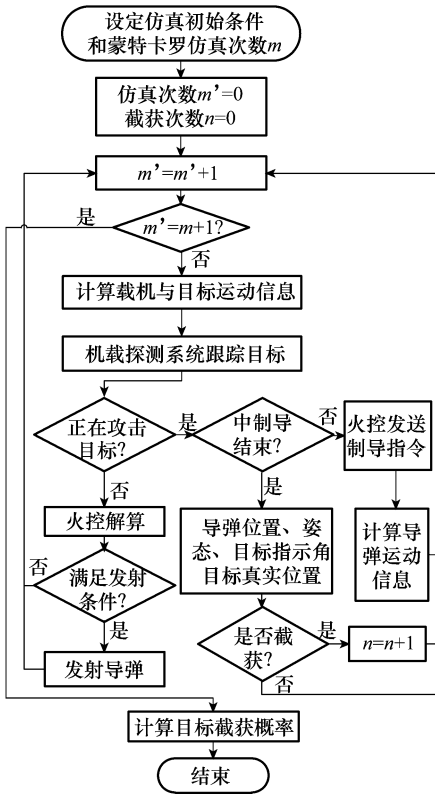


图 3 目标截获概率仿真计算流程图

### 2.4 火控攻击方案评估粗糙模型的建立

由于计算能力和评估时间的限制,利用上述仿真模型实时准确地评估各个备选方案是不可行的;根据序优化理论“序比较”的特性,只需建立评价函数的粗糙模型,对各备选方案进行快速评估即可。

一般地,粗糙模型通常是在精确模型的基础上做一些合理的简化,但对于图 3 的仿真模型,再做简化将导致模型严重失真;减小仿真次数从理论上讲是一种可行的方法,但仿真次数过少将导致方案评估值可能含有很大误差,不利于“序比较”。因此,本文提出利用仿真模型得到的部分样本值来对式(1)或仿真模型进行拟合,利用拟合后的模型作为快速评估的粗糙模型。

本文采用如图 4 所示的  $n-2n-1$  型三层前向 BP 网络模型对火控攻击方案仿真评估模型进行拟合。该网络含有  $2n$  个( $n$  为网络输入节点的个数)隐含节点,隐含层采用双曲正切 S 型传递函数,输出层采用线性传递函数;网络参数可训练得出,训练样本数据由精确仿真评估模型提供。

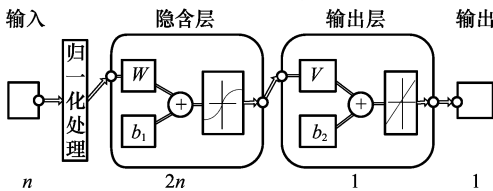


图 4 用来粗糙评估的 BP 网络结构

与利用仿真评估模型进行粗糙评估相比,利用拟合后的 BP 网络不仅能大大减小粗糙评估的耗时,还能保证评估数据的有效性。

### 3 基于序优化方法的火控攻击方案寻优步骤

基于序优化方法的火控攻击方案寻优方法步骤如下:

(1) 从火控攻击方案构成参数的有效范围内均匀采样,形成备选方案集;

(2) 从备选方案集中按机会均等原则随机抽取  $N$  个可行方案,利用“盲选”规则<sup>[8]</sup>和粗糙评估模型对可行方案集进行快速粗糙评估,然后根据粗糙评估得到的结果画出 OPC 曲线,并与图 1 对比确定火控攻击方案寻优问题的 OPC 类型;

(3) 确定用于进行精确评估的选定集合  $S$ ,方法是取可行方案集按粗糙评估结果排序后的前  $s$  个可行方案。 $s$  由式(3)确定

$$s(k, g) = e^{Z_0} k^{\rho} g^{\gamma} + \eta \quad (3)$$

式中,  $Z_0$ 、 $\rho$ 、 $\gamma$ 、 $\eta$  是与 OPC 类型和噪声等级相关的常量,具体取值可参见文献[20];  $k$  和  $g$  是根据问题需求预先指定的值,其中  $g$  表示期望可行方案集中包含足够好方案的个数,  $k$  表示要求集合  $S$  中至少包含  $k$  个真实足够好方案;

(4) 对选定的  $s$  个可行方案进行精确仿真评估,对精确评估结果进行排序;

(5) 针对火控攻击方案寻优这一具体问题,选取接近某一特定效能数值的若干组较优方案进行进一步分析研究。

### 4 算例分析

#### 4.1 算例原始数据及预处理

假设某型机载雷达方位角探测误差在  $0.1^{\circ} \sim 0.3^{\circ}$  内,俯仰角探测误差在  $0.2^{\circ} \sim 0.6^{\circ}$  内,距离探测误差在  $50 \sim 300$  m 内,速度探测误差在  $30 \sim 150$  m/s 内,要求空空导弹在  $60 \sim 80$  km 之间发射。找出能使空空导弹的目标截获概率达到 90% 左右的火控攻击方案。

将以上数据按一定的步长(角度探测误差:  $0.1^{\circ}$ , 距离探测误差: 50 m, 速度探测误差: 30 m/s, 导弹发射距离: 2 km) 采样,这样共有  $3 \times 5 \times 6 \times 5 \times 11 = 4950$  种组合方案。要以遍历搜索的方式进行方案寻优,显然不可取。下面将采用本文提出的序优化方法进行方案寻优。

#### 4.2 粗糙评估模型有效性分析

从理论上分析,使用 BP 网络可以对任意模型进行拟合,即本文提出的基于 BP 网络拟合的粗糙模型是有效的。但为了提高粗糙模型的可信度,下面将通过一组数值实验来验证本文所提的粗糙模型的有效性。

验证实验设计如下:从组合方案中随机抽取 100 组方案用仿真评估模型进行精确评估,并以结果数据训练 BP 网络;再从组合方案中随机抽取 20 组方案,并按从 1~20 的

顺序分别编号,然后分别用仿真评估模型(对应精确评估)和 BP 网络模型(对应粗糙评估)对这 20 组方案进行评估实验,按照评估得到的导弹截获概率对方案编号分别进行排序。通过对比排序结果,可以验证粗糙评估模型是否有效

(若精确评估排序得到的样本序列中的前几项在粗糙评估得到的序列也排在前列,则可认为粗糙评估模型有效)。为了排除数据选取带来的实验偶然性,随机选取两组样本进行实验。实验结果如表 1 所示。

表 1 粗糙评估模型有效性验证实验结果比较

|                            |                            | 粗糙排序          | 4,1,18,20,13,8,12,6,3,19,11,10,9,5,15,17,7,14,16,2 |
|----------------------------|----------------------------|---------------|--|
| 样本一                        | 按目标截获概率排序(降序)              | 精确排序          | 4,1,20,18,13,8,12,10,19,15,9,11,17,6,3,7,2,14,5,16 |
|                            | 按目标截获概率与 90% 的差值的绝对值排序(升序) | 粗糙排序          | 13,20,8,18,1,4,12,6,3,19,11,10,9,5,15,17,7,14,16,2 |
|                            |                            | 精确排序          | 18,20,1,4,13,8,12,10,19,15,9,11,17,6,3,7,2,14,5,16 |
|                            | 样本二                        | 按目标截获概率排序(降序) | 粗糙排序   |
|                            |                            | 精确排序          | 18,3,10,9,20,16,17,7,14,1,2,19,4,12,8,6,11,13,15,5 |
| 按目标截获概率与 90% 的差值的绝对值排序(升序) |                            | 粗糙排序          | 17,1,10,14,20,9,16,7,18,3,4,19,12,6,8,11,2,5,13,15 |
|                            |                            | 精确排序          | 17,16,20,7,9,14,1,10,3,18,2,19,4,12,8,6,11,13,15,5 |

对于表 1 中的两个样本,粗糙值序列与精确值序列不完全相同,存在一定误差,不过这是正常现象,因为粗糙评估模型只是对精确模型的拟合,拟合本身就存在原理误差。但是无论是按目标截获概率排序还是按目标截获概率与 90% 的差值的绝对值排序,精确值排序后的序列中的前 5 个方案的编号在粗糙值排序后的序列中的位置也是比较靠前的。因而,本文所构建的 BP 网络粗糙评估模型对方案进行性能排序是可行的、有效的。

4.3 序优化方法寻优

使用粗糙评估模型按上节给出的序优化寻优步骤对所有规划方案进行粗糙评估。图 5 给出了对这些方案进行粗糙评估时,按粗糙评估所得目标截获概率与 90% 差值的绝对值排序后得到的 OPC 曲线。

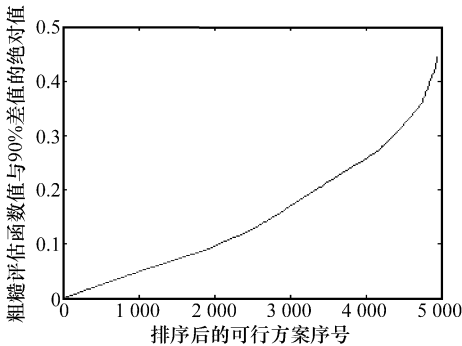


图 5 火控攻击方案寻优问题的 OPC 曲线

用图 5 中的曲线跟图 1 中的 5 种曲线类型作对比,显然可以得出:该算例中的 OPC 曲线属于“Flat”型。根据 OPC 曲线类型查文献[20],有: $Z_0 = 8.520 0, \rho = 0.894 4, \gamma = -1.228 6, \eta = 5.00$ ,取  $g = 200, k = 3$ ,代入式(3)计算得: $s = 24.947 1$ 。由以上计算,取粗糙评估排序后前 25 个方案进行精确仿真求解。

经过对前 25 组方案进行精确仿真求解,发现以下 4 组火控攻击方案下导弹目标截获概率较为接近 90%,见表 2。

表 2 目标截获概率较接近 90% 的 4 组火控攻击方案

| 方位角探测误差/(°) | 俯仰角探测误差/(°) | 距离探测误差/m | 速度探测误差/m·s <sup>-1</sup> | 发射距离/km | 目标截获概率/% |
|-------------|-------------|----------|--------------------------|---------|----------|
| 0.1         | 0.3         | 100      | 120                      | 76      | 90.2     |
| 0.2         | 0.3         | 100      | 90                       | 76      | 90.2     |
| 0.3         | 0.3         | 200      | 30                       | 62      | 90.4     |
| 0.3         | 0.3         | 100      | 90                       | 62      | 89.6     |

对于火控攻击方案寻优问题,不可能存在唯一的最优方案。通常要从以上 4 个或更多较优的攻击方案中,根据其他条件(比如对技术的要求程度、效费比等),选用更适合、更经济的攻击方案。

5 结束语

火控攻击方案寻优问题作为一个仿真优化问题,仿真评估耗时长的的问题一直没有得到很好解决。本文将序优化方法应用于火控攻击方案寻优问题,使用拟合后的 BP 网络模型对攻击方案进行粗糙评估,缩小了需要精确评估的方案范围;然后用精确模型进行仿真评估,能大大减少评估计算量和耗时。算例分析证明,序优化是一种行之有效的解决火控攻击方案寻优问题的优化方法。

参考文献:

[1] Tekin E, Sabuncuoglu I. Simulation optimization: a comprehensive review on theory and applications[J]. *IIE Transactions*, 2004, 36(11):1067-1081.  
 [2] Fu M C, Glover F W, April J. Simulation optimization: a review, new developments and applications[C] // *Proc. of the Winter Simulation Conference*, 2005:83-95.  
 [3] Wang L, Zhang L, Zheng D Z. Advances in simulation optimization[J]. *Control and Decision*, 2003, 18(3): 257-262. (王凌, 张亮, 郑大钟. 仿真优化研究进展[J]. 控制与决策, 2003, 18(3): 257-262.)  
 [4] Geng D. Simulation-based optimization[D]. Madison: University of Wisconsin, 2007.

- [5] Li D, Wang D W. A survey on simulation-based optimization[J]. *Control Engineering of China*, 2008, 15(6): 671 - 677. (李东, 汪定伟. 基于仿真的优化方法综述[J]. 控制工程, 2008, 15(6): 671 - 677.)
- [6] Allen T T, Vuckovich D N. An open-source population indifference zone-based algorithm for simulation optimization [C] // *Proc. of the Winter Simulation Conference*, 2010: 231 - 241.
- [7] Pasupathy R, Henderson S G. SimOpt: a library of simulation optimization problems [C] // *Proc. of the Winter Simulation Conference*, 2011: 4075 - 4085.
- [8] Horng S C, Yang F Y. Ordinal optimization based algorithm for hotel booking limits problem[C]//*Proc. of the International Symposium on Computer, Consumer and Control*, 2012: 759 - 762.
- [9] Chen Y J, Zhou L S. Study on the algorithm for train operation adjustment based on ordinal optimization [C] // *Proc. of the ASME Joint Rail Conference*, 2010: 451 - 458.
- [10] Singh R, Pal B C, Jabr R A, et al. Meter placement for distribution system state estimation: an ordinal optimization approach[J]. *IEEE Trans. on Power Systems*, 2011, 26(4): 2328 - 2335.
- [11] El Ramli R, Awad M, Jabr R A. Ordinal optimization for dynamic network reconfiguration[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2011, 39(16): 1845 - 1857.
- [12] Lin S S, Horng S C, Lin C H. Embedding sensitivity theory in ordinal optimization for decentralized optimal power flow control[J]. *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, 2012, 34(1): 145 - 153.
- [13] Ma Y H, Hu J. Three-impulse rendezvous fuel optimization based on ordinal optimization theory[J]. *Journal of Astronautics*, 2009, 30(2): 663 - 668. (马艳红, 胡军. 基于序优化理论的三脉冲交会燃料寻优[J]. 宇航学报, 2009, 30(2): 663 - 668.)
- [14] Hu S C, Sun C Q, Liu Y W. Transfer trajectory design for halo orbit based on ordinal optimization theory[J]. *Journal of Astronautics*, 2010, 31(3): 662 - 668. (胡少春, 孙承启, 刘一武. 基于序优化理论的晕轨道转移轨道设计[J]. 宇航学报, 2010, 31(3): 662 - 668.)
- [15] Cui H Z, Han C. Satellite constellation configuration design with rapid performance calculation and ordinal optimization[J]. *Chinese Journal of Aeronautics*, 2011, 24(5): 631 - 639.
- [16] Ho Y C, Sreenivas R S, Vakili P. Ordinal optimization in DEDS[J]. *Journal of Discrete Event Dynamic Systems*, 1992, 2(2): 61 - 68.
- [17] Ho Y C, Zhao Q C, Jia Q S. *Ordinal optimization: soft optimization for hard problems*[M]. New York: Springer, 2007.
- [18] Li F, Wang X L, Wang Q F. Study on target acquisition probability of air-to-air missiles[J]. *Electronics Optics & Control*, 2010, 17(8): 15 - 20. (李峰, 王新龙, 王起飞. 空空导弹目标截获概率研究[J]. 电光与控制, 2010, 17(8): 15 - 20.)
- [19] Zhao Z W, Zhang A, Xia Q J, et al. Simulated computation of target-acquisition probability of intermediate-long-range air-to-air missile[J]. *Fire Control & Command Control*, 2011, 36(10): 160 - 164. (赵志伟, 张安, 夏庆军, 等. 中远程空空导弹目标截获概率仿真计算[J]. 火力与指挥控制, 2011, 36(10): 160 - 164.)
- [20] Lau E T W, Ho Y C. Universal alignment probabilities and subset for ordinal optimization[J]. *Journal of Optimization Theory and Applications*, 1997, 93(3): 455 - 489.

## 作者简介:

**李波** (1978 -), 男, 副教授, 硕士研究生导师, 博士, 主要研究方向为决策理论、先进航空火力控制。

E-mail: libo803@nwpu.edu.cn

**刘学全** (1988 -), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为作战效能评估、先进航空火力控制。

E-mail: liuxuequan1872@163.com

**高晓光** (1957 -), 女, 教授, 博士研究生导师, 博士, 主要研究方向为计算智能、先进航空火力控制。

E-mail: xggao@nwpu.edu.cn